

BWRプラント開発の将来動向

Development of Next BWR Plant

守屋公三明*

Kumiaki Moriya

谷川尚司*

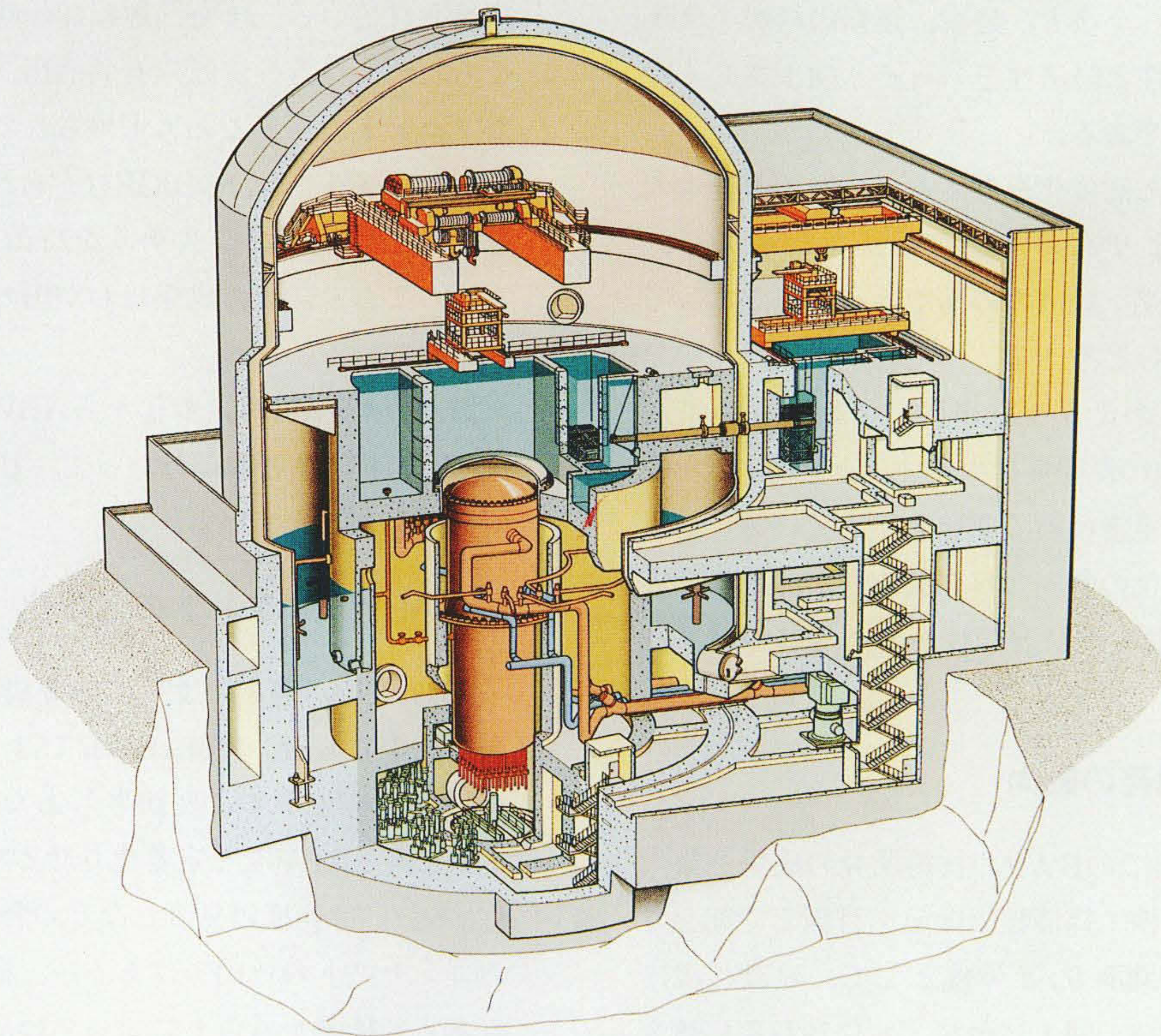
Naoshi Tanikawa

木下詳一郎*

Shōichirō Kinoshita

臺俊介*

Shunsuke Utena



ウォーターウォールを採用した、次世代型BWR(沸騰水型軽水炉)の格納容器

自然放熱ができるウォーターウォールを採用した格納容器は、万一の過酷事故が発生しても、放射性物質の格納容器外への放散を防止することができる。

BWR発電が今後も長期にわたって原子力発電の主流をなしていくことが予想される中で、現在建設中のABWR(改良型BWR)では、従来のBWRに比べ、安全性、信頼性、運転性、経済性などいっそうの向上が図られ、定着化に向けて努力が払われている。その一方で、将来の社会の変革に対応できるように、すでに電力会社、メーカーの共同でABWRに

続く次の炉型開発の動きが始まっており、日立製作所はこれら新しい軽水炉の開発を鋭意進めている。

今後のBWR発電の目的も、安全性、信頼性、運転性と経済性の向上にあり、21世紀前半の原子力発電の中核を担うことを目指して開発が進められている。

* 日立製作所 日立工場

1 はじめに

日立製作所は、これまでも軽水炉による発電技術の信頼性、安全性、経済性の向上を目指してたゆまぬ開発を続けてきた。ABWRは、その開発が今世紀の集大成として結実したものであり、現在東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所6,7号機(以下、柏崎刈羽6,7号機と言う。)が建設中である。今後も、建設、運転の経験を反映させ、ABWRの信頼性と経済性をいっそう向上させるため努力していく考えである。

社会の急速な発展と高度化を考えると、原子力発電の需要はこれからもより高い伸びが期待されるので、BWRは信頼性、安全性、経済性の面でいっそう向上していかなければならないと考える。

日立製作所は以上のような将来動向にかんがみて、ABWRの定着化に向けた開発に力を注ぐとともに、次世代の炉型概念とその要素技術の開発を始めている。ここでは、ABWRの定着化の動向と日立製作所が開発している次世代BWRの概念および要素技術の一端について述べる。

2 原子力発電開発の動向

ABWRは、これまでのBWRの技術開発の成果を集大成し、信頼性、安全性、経済性の向上を目指して開発された。現在は、柏崎刈羽6,7号機として、建設の段階にある。このABWRは、図1に示すように1978年に研究開発を開始し、10年余りをかけて建設にこぎ着けたもの

であり、今後の軽水炉発電設備の主流をなすものである。したがって、当面は、ABWRの徹底した標準化、合理化などの定着化へ向けた努力が開発の中心である。

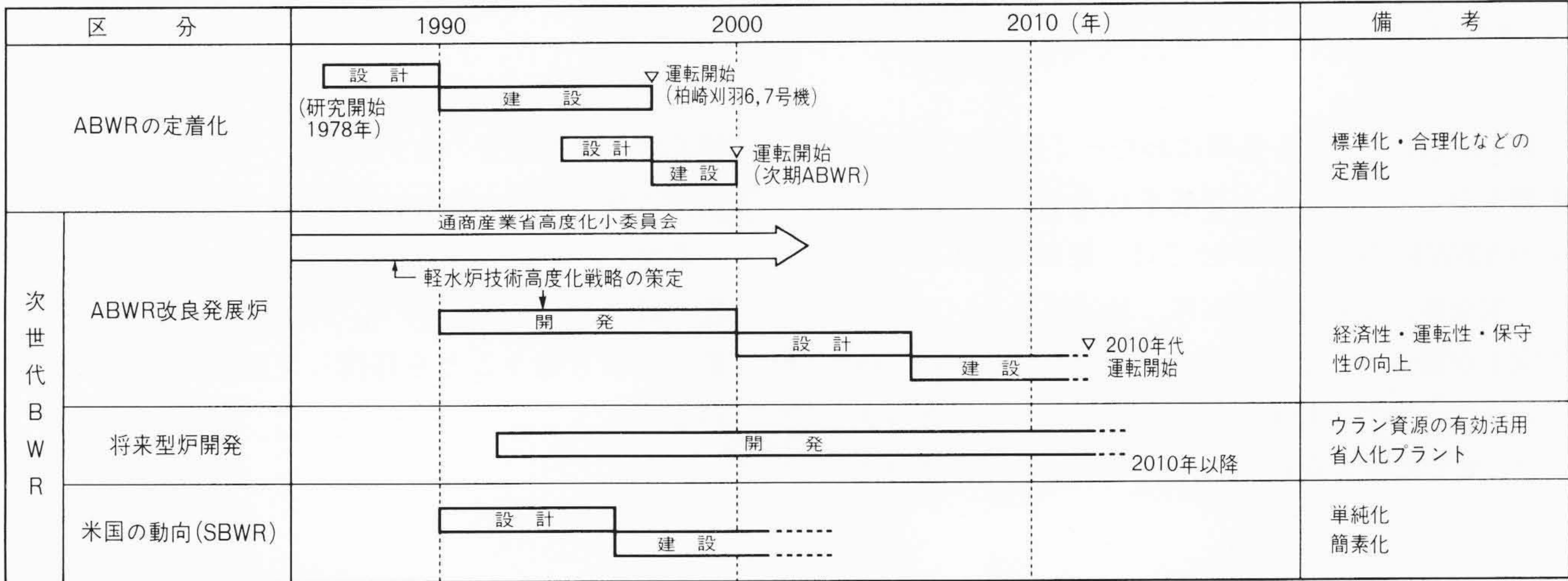
一方、BWR発電の時代は今後も長期的に続くことが予測されるので、将来の経済、社会の大きな変革に対応するために、2010年代の運転開始を目指した新しい炉型の開発研究が、電力・メーカーの共同研究としてすでに開始されている。また、運転開始時期が2010年代以降となるため、ウラン資源の有効活用、徹底的に省人化されたプラントであることも求められている。

なお、海外でも、米国GE社が自然循環炉心、静的機器を活用した簡素なシステムを特徴としたSBWRの開発を行っており、その成果はわが国の開発にも適宜取り入れられている。

以上のABWRの定着化からABWRの次を担う次世代BWRの開発の全体にわたって、日立製作所は積極的に研究開発を行っている。

3 ABWRプラントの定着化

ABWRは、前述のように柏崎刈羽6,7号機として現在建設中である。次期ABWRでは、初号機の建設経験、運転経験を生かすことがさしあたっての重要課題である。しかしABWRを定着化させるためには、さらに標準化、あるいは仕様の見直しなどの合理化、さらに、ABWRのコンセプトの枠内ではあるが、機器システムの改良にもあえて挑戦することによって経済性のいっそうの向上が必要である。



注：略語説明 SBWR (単純化BWR)

図1 今後のBWR開発の動向

ABWRの定着化に向けて信頼性、経済性のいっそうの向上を目指すとともに、次世代に向けて新しい炉型開発に着手している。

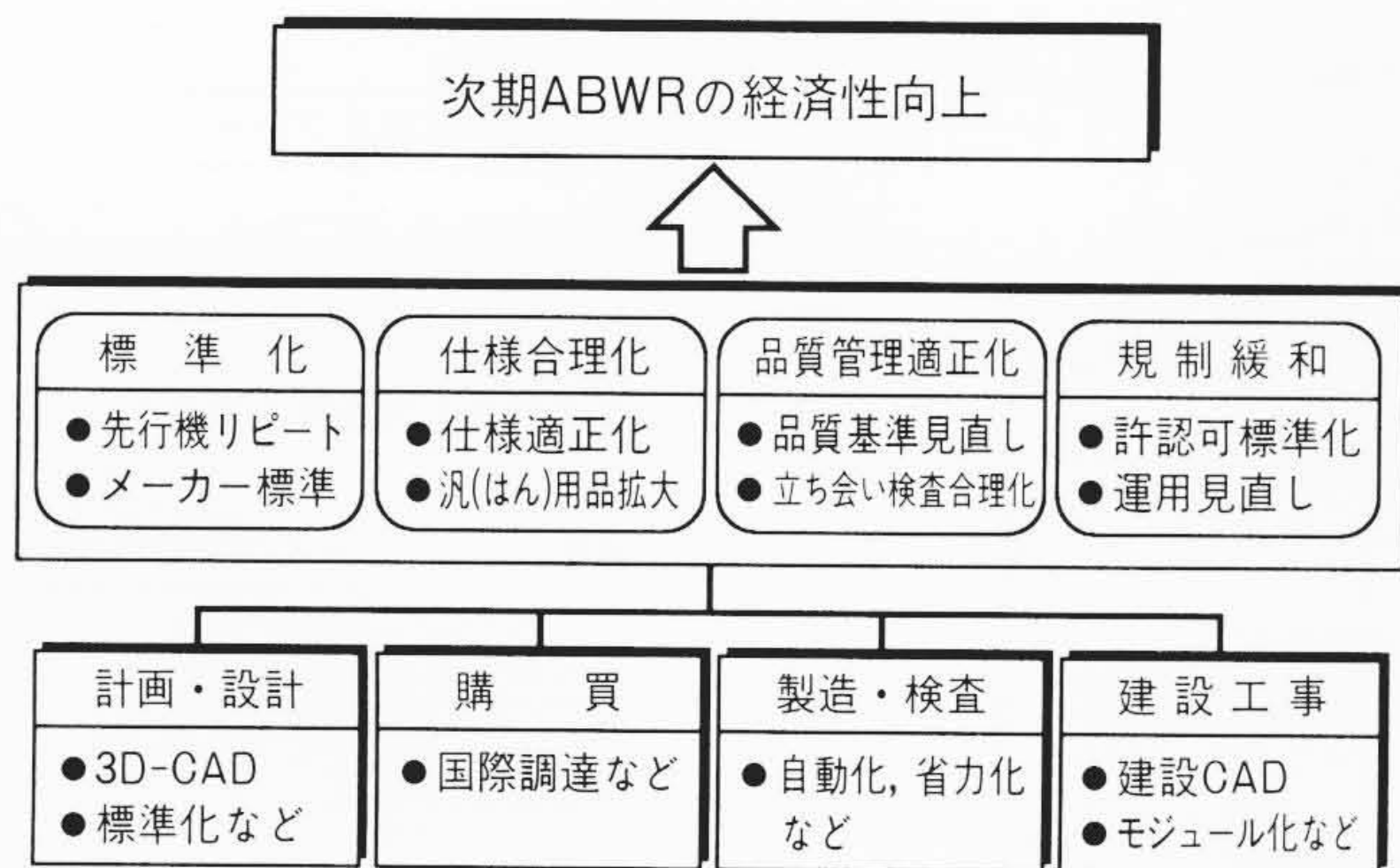


図2 ABWRの経済性向上の考え方

プラントの合理化を推進するためには、計画・設計、購買、製造・検査、および建設工事全体にわたって一貫した検討が必要である。

ABWRの経済性向上の考え方を図2に示す。プラントの合理化を推進するためには、計画・設計、購買、製造・検査、および建設工事全体にわたって一貫した検討が必要である。日立製作所は配管・配置の三次元CAD、国際調達、建設のCAD化・モジュール化などの新しい手段を積極的に投入していく考えである。

機器システムの改良については、運転実績の経験を生かしつつ、標準化などの動きと連係して最も効果的な推進を心がける必要がある。ABWRの主要システムの一つである原子炉再循環インターナルポンプシステムの電源構成の改良案を図3に示す。現在のサイリスタおよびGTOを用いた方式から流体継手の方式へ変更することにより、電源の信頼性を維持しつつ、設備の大幅な簡素

化を図ることができる。このほかにも、改良型制御棒駆動機構(FMCRD)、格納容器などの主要機器の改良についても検討中である。

以上述べたように、日立製作所は次期ABWRの定着化に向けて、構成機器単位からプラント全体システムにわたっての、徹底した改良に力を注いでいく考えである。

4 次世代BWRの開発

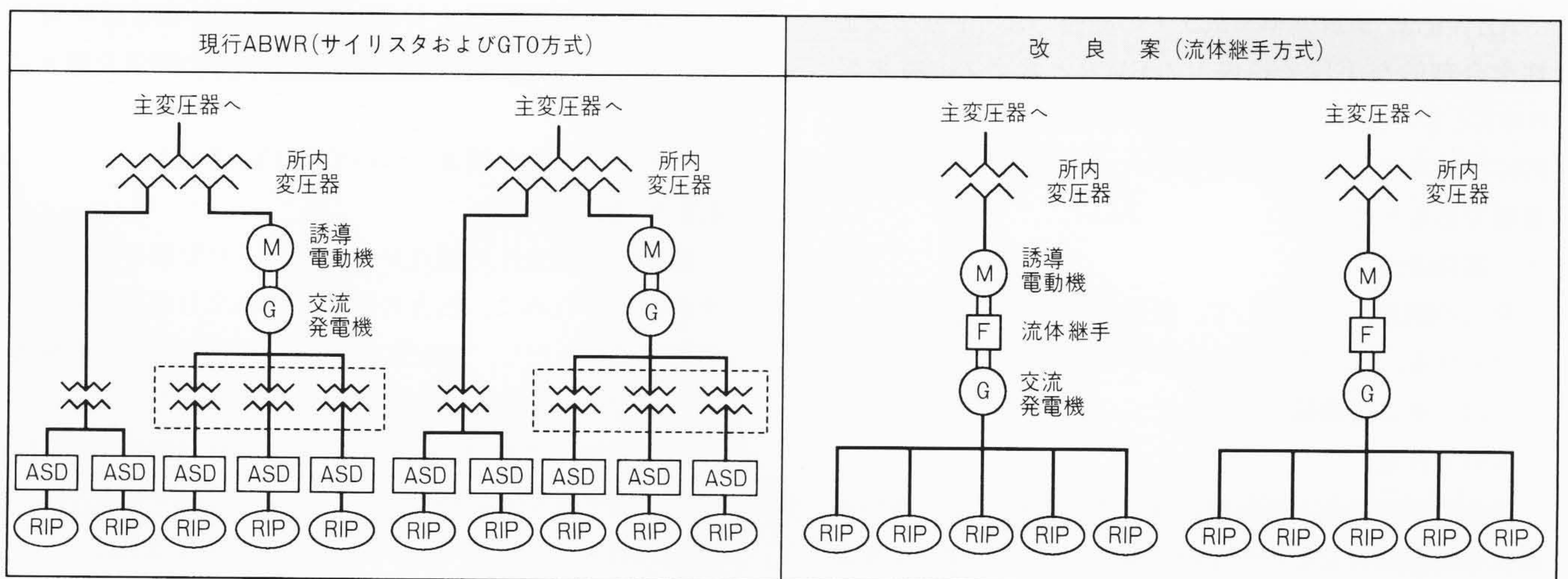
4.1 開発ニーズ

次世紀での軽水炉開発を見据えると、他分野の産業の進歩を考慮しながら社会のニーズに合わせた新しい炉型の開発が必要である。炉型開発のニーズと開発目標について以下に述べる。

まず、2010年代の運転開始を目指した炉型とすると、諸統計などの将来予測から、次の3点が基本ニーズと考える。

(1) 大出力化

総合エネルギー調査会報告書⁹⁾などに基づく、今後も軽水炉の時代が続き、2010年代では発電設備容量も現在の2倍以上である7,250万kWに達し、2030年には1億700万kWに達すると見込まれている。一方で、今後の社会では労働人口の不足、労働時間の短縮、労働条件の改善がいつそう求められることになるため、発電所1基当たりの従業者数を減少させていく努力が必要になると予測される。さらに、発電需要の大幅な伸びとは逆に、発電所の立地が困難になると考えられるため、サイト条件に応じて可能な限り出力を高くすることが求められる。



注：略語説明 ASP(可変周波数電源装置)、RIP(原子炉再循環インターナルポンプ)

図3 原子炉再循環系の電源系の改良案

ABWRの原子炉再循環系の電源系を、現在のサイリスタおよびGTO制御方式から流体継手の方式にすることにより、経済性の向上が図れる。

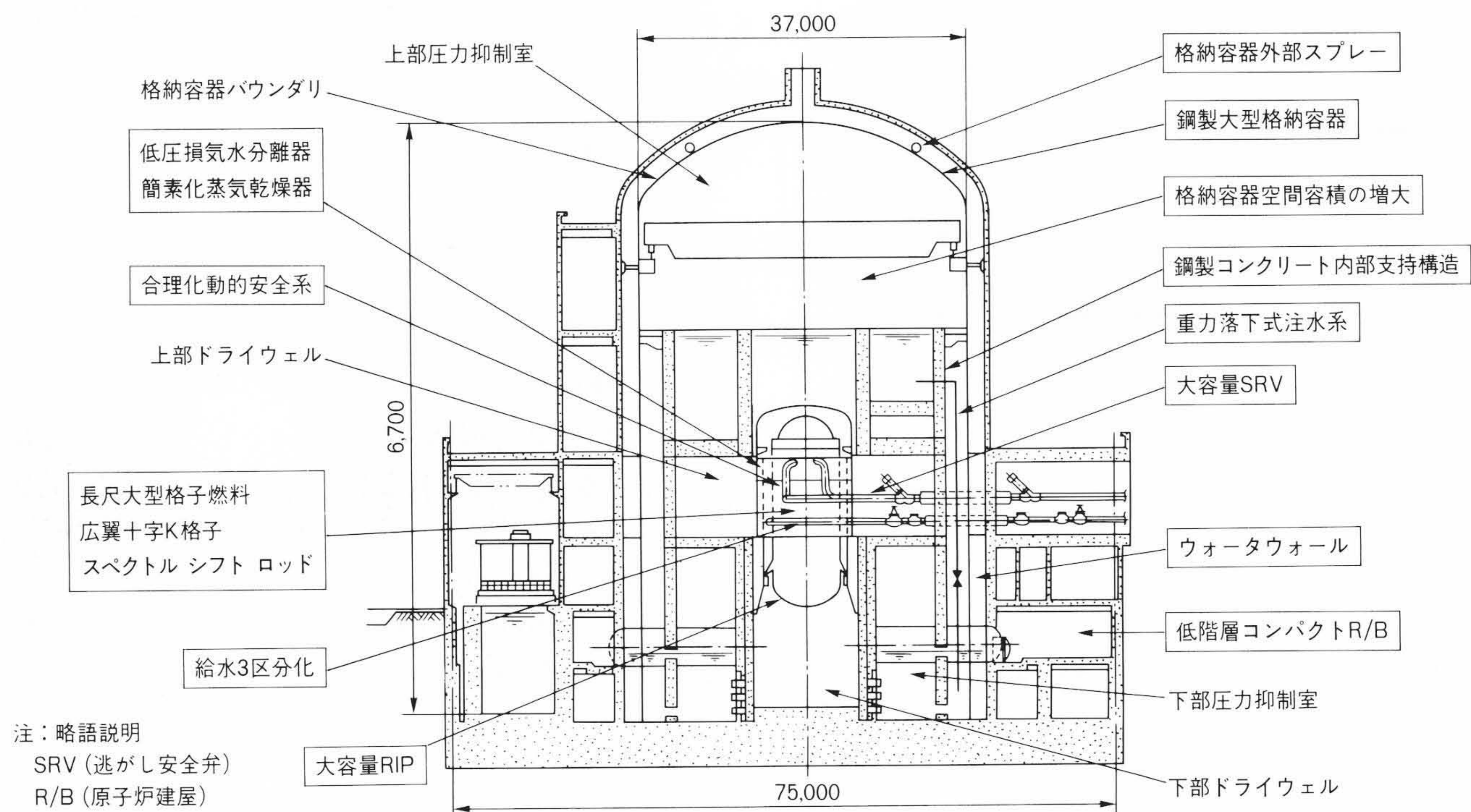


図4 次世代BWRのプラントの概念(例)

次世代のBWRでは、炉心出力密度の増加、主要機器システムの大容量化などによる経済性向上、ウォータウォール型大型格納容器による安全性の向上が図られている。

したがって、次世代BWRの第一の開発ニーズは、サイト条件に柔軟に対応した大出力化であると考ええる。

(2) 安全性の向上

次に、立地を少しでも容易にし、原子力発電の推進に対する一般の理解を高めるためには、安全性のいっそうの向上が必要であると考えられる。

ABWRは、設計基準事故までの範囲では、十分な安全性を合理的な手段で達成したBWRと言える。将来型BWRとしてはさらに万一の過酷事故などの備えを合理的に取り入れ、社会的受容性をいっそう向上することが重要であると考ええる。

(3) 高経済性

第三の開発ニーズとして、経済性のいっそうの向上があげられる。原子力発電の推進が社会的に受容されるためには、単に資源論だけではなくいっそうの経済性向上が求められる。

以上のほかにも、運転性、保守性、燃料サイクルへの柔軟な対応能力などの向上が必要であることはいうまでもない。2010年代の運転開始には間に合わないかもしれないが、長期的な視点に立つと、燃料サイクル・ウラン資源の有効利用という点も重要な課題である。開発に多

くの時間と資金がかかることを考えると、今から着実に開発していく必要がある。日立製作所は2010年代向けのBWRの開発から炉心を抜本的に改良して、ウラン資源の効率的な利用を目指したRBWR¹⁾などの次世代炉の開発を推進している。

4.2 次世代BWRのプラント概念

2010年代運転開始を目指した炉型の開発目標に対して、日立製作所が現在開発中のプラントの概念を図4に示す。

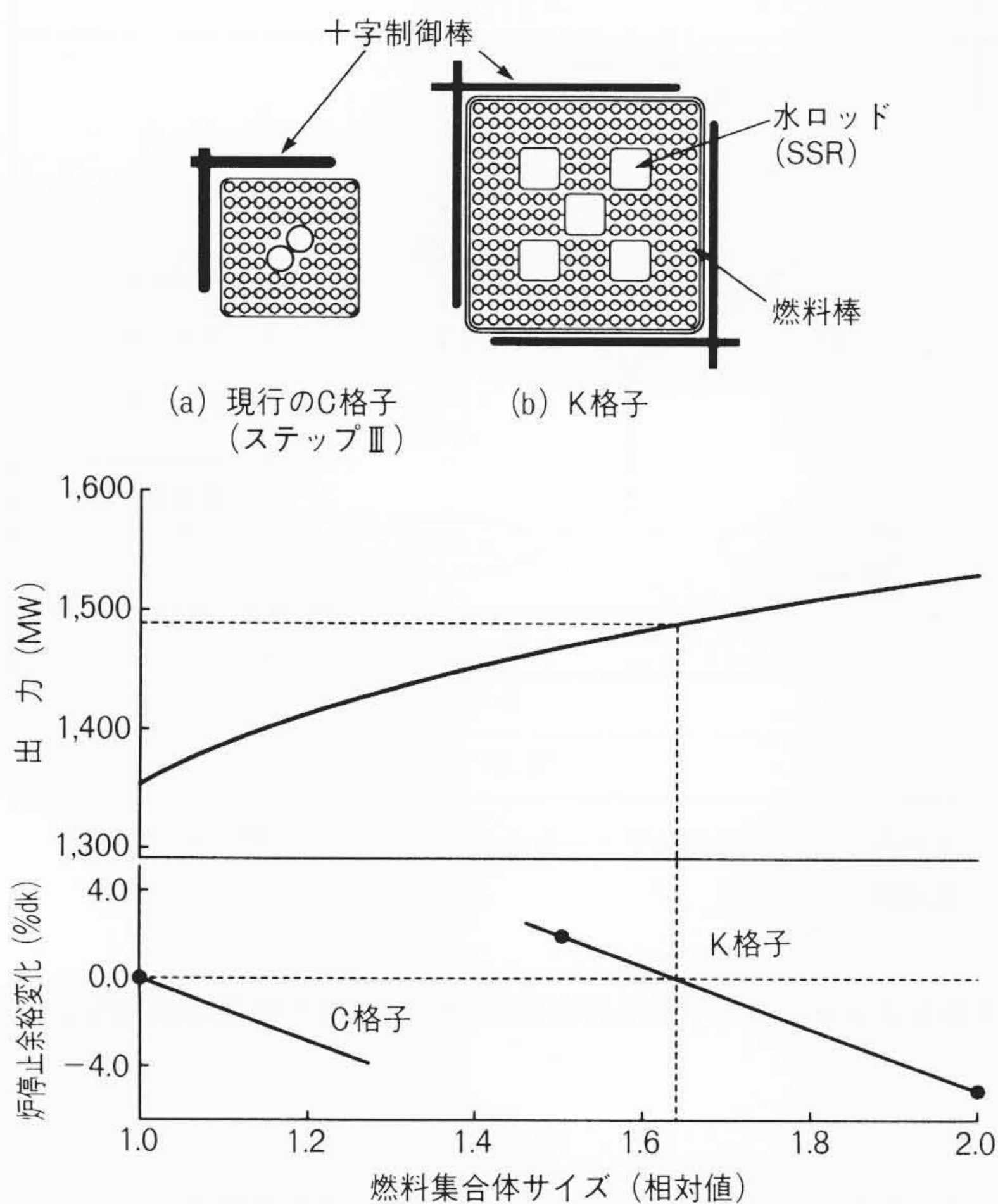
このプラントの概要について以下に述べる。

4.2.1 出力の増加

経済性と製造性の観点から原子炉圧力容器の径の増加を抑制するために、出力の増加は炉心出力密度の増加で対応する。ただし、運転性、安全性を現行ABWRと同等とするため、以下に示す要素技術を採用した。

- (1) 大型格子燃料(格子サイズが現行の1.5倍のK格子)
- (2) 広翼十字型制御棒
- (3) 大容量インターナルポンプ(現行の約1.25倍)
- (4) 過渡緩和システム
- (5) 動的非常用炉心冷却系

ここで、(1)と(2)は、図5に示すように、原子炉圧力容



注：略語説明 SSR (スペクトル シフト ロッド)

図5 大型K格子の採用による出力増加

経済性向上の一環として、大型K格子による出力密度の増加が考えられる。炉停止余裕を現行炉と同等に確保しながら出力の向上が図れる。

器の径を変えずに燃料集合体の線出力密度の余裕および原子炉の停止余裕をABWRと同等に確保しながら、1,500 MW以上の出力を達成するために採用した。

(3)は出力増加に伴って、熱的余裕を確保するために炉心流量を増加する必要があるが、経済性と配置上の観点から、現在と同じ10台のRIPで1,700 MWに対応できるようにするものである。

(4)の過渡緩和システムは、出力の増加によって減少する Δ CPR (Critical Power Ratio) と水位変化幅の余裕を回復させるために制御系を高度化するものであり、(5)の非常用炉心冷却系は、大出力に対応して静的安全系は採用しないで、動的システムだけで構成するものとした。

4.2.2 安全性向上

まず、設計基準事故に対しては、出力規模が大きいことを考えて、以下に示すようにABWRと同等のシステム構成とし、炉心の冷却と崩壊熱の除去が速やかに行われるようにした。

(1) 動的非常用炉心冷却系

(2) 残留熱除去系

一方、万一の炉心溶融発生時に対しては、格納容器バ

ウンダリを運転操作あるいは動的なシステムを期待しなくても冷却維持する方策として、図4に示すウォータウォール型銅製大型格納容器を採用することにした。

ウォータウォール型大型格納容器とは、圧力抑制室ドライウェルを内包する米国GE社のMARK-III型の形状に対して、圧力抑制室を、圧力抑制プールを持つ下部圧力抑制室と運転階を内包する上部圧力抑制室に分けたものである。二つの圧力抑制室は、格納容器の設計圧力を作動圧力としたラプチャーディスクで分離されている。また、下部圧力抑制室の外側は通常時では単純な空間ギャップであるが、過酷事故時には水を張ることによってウォータウォール²⁾とすることができるようにした。さらに、圧力抑制プールの吸熱能力を向上させるために、機器プールの水を圧力抑制プールに落水させるシステムと、下部ドライウェルでの炉心溶融物の冷却が行われるように、圧力抑制プールの水を下部ドライウェルに落とすラインが設けられている。この結果、従来の圧力抑制型格納容器に比べ空間容積および格納容器内に保有される水が飛躍的に増加し、格納容器のバウンダリがどのような場合でも外側から直接冷却維持されるため、過酷事故に対する耐性は向上する。さらに、事態をより速やかに収束させることが望ましいため、格納容器外部スプレー系を格納容器の頂部に設け、運転員の操作によって積極的除熱が行えるようにした。

また、図6に示すように、過酷事故対策の強化が経済性の悪化を招くことがないように、工学的安全設備との間で最適化を行い、残留熱除去系を3区分から2区分に合理化し、非常用のディーゼル発電機を水冷式から空冷式に替え、補機冷却系を大幅に削減した。

4.2.3 経済性

出力規模の増加に加えて出力密度を高くしたことにより、経済性は向上する。また、大型格子燃料の採用によって燃料取替体数、CR (制御棒) の交換、およびCRDの点検体数の低減が図れるため、設備利用率が向上する。

制御棒の大型化によって体数が低減するばかりでなく、スペクトルシフトロッド³⁾の採用によって全制御棒引き抜き運転が可能なたため、取替頻度も小さく経済性は向上する。さらに、大型格納容器が運転階を内包するため、格納容器とは独立に原子炉棟の低階層化、建設時の大型モジュール化、および並進建設の可能性など建設の合理化が図れる可能性がある。なお、出力が増加しても、大容量のRIP、大型のSRVを採用することにより、機器の員数増加が抑制されコスト増も最小限度で対処で

		ABWR	次世代BWR
構成			
性能	LOCA	炉心冠水維持	同 左
	炉心損傷頻度	ベ ー ス	同 等
	格納容器損傷頻度	ベ ー ス	同 等 以 下

注：略語説明ほか  (改良箇所)，RHR (原子炉崩壊熱除去)，LPFL (低圧炉心注水系)，D/G (非常用ディーゼル発電機)，FLS (炉心冠水系)
RCIC (原子炉隔離時冷却系)，LOCA (冷却材喪失事故)，HPCF (高圧炉心注水系)

図6 次世代BWRの安全系構成

ウォータウォールをRHRのバックアップとすることにより、ABWRのRHR3区分を2区分とする。D/Gの負荷の低減、補機冷却系の削減などの合理化が図れる。

きると考える。また、過酷事故対策として、格納容器の大型化、ウォータウォールなどの追加設備があるものの、原子炉棟の低階層化によるコスト増加の抑制、安全系の合理化によって経済性は阻害されないと考える。

5 おわりに

ここでは、日立製作所で行っているABWRの定着化と次世代BWRの開発の概要について述べた。

これからも原子力発電は、エネルギーセキュリティの観点だけでなく、経済性の点でも有利な発電方式として発展していくものと考え。日立製作所はこれまでどお

り信頼性、安全性を第一に、ABWRの経済性をいっそう向上させるために努力し、定着化に貢献していく。また、社会の急速な変革にも対応して、ABWRに続く炉型についても、さまざまなニーズを想定して対応していく。

原子力の開発期間は非常に長く、ABWRの開発着手から実用化までに約20年を必要としたことを考えると、将来のために今からでも次世代BWRの開発に着手することが必要である。今後も、電力会社のご意見、国のご指導を仰ぎながら実用化に向けて努力していく考えである。

参考文献

1) 竹田練三，外：エネルギー長期安定供給に対応した軽水炉の開発(1)，日本原子力学会「1994秋の大会」

2) Y. Kataoka, et al.：Thermal-Hydraulic Characteristics and Heat Removal Capability of Confinement Cooling System with External Water Wall：J. of Nucl. Sci. & Technol., Vol. 27, No. 9, 802～814 (Sept., 1990)

3) O. Yokomizo, et al.：Thermal-Hydraulic Characteristics of Spectral Shift Rod for BWR Fuel Bundle, Int. Conf. on Multi Phase Flows '91, (Sept., 1991)